

ANÁLISE DE FALHA NO CUBÍCULO DE UMA SUBESTAÇÃO LOCALIZADA EM PARACATU

Werick Alves da Silva¹
Márcio da Silva Fernandes²

Resumo: Neste artigo, uma falha ocorrida no cubículo da subestação de uma mineradora situada no município de Paracatu, noroeste de Minas Gerais, é analisada de modo que possam ser definidos, por meio de um processo inferencial, a razão para tal acontecimento e os procedimentos necessários para que futuros eventos desta natureza sejam evitados, ou pelo menos contornados de forma mais eficiente. Para isso, o estudo se fundamenta em uma análise sistemática do comportamento dos sistemas de proteção incumbidos da tarefa de eliminar a falha, assim como do contexto operacional no qual o ambiente que a proporcionou estava inserido. A partir da coleta dos dados, a falha em estudo foi esclarecida de modo a expor a forma como evoluiu até seu ápice, e a importância de uma gestão correta no que envolve o sistema elétrico mostra sua essencialidade no caso em questão.

178

Palavras-Chave: Análise; Falha; Cubículo; Subestação.

Abstract: In this article, a failure occurred in the substation cubicle of a mining company located in the municipality of Paracatu, northwestern Minas Gerais, is analyzed so that it can be defined, through an inferential process, the reason for such an event and the procedures necessary for future events of this nature to be avoided, or at least circumvented more efficiently. For this, the study is based on a systematic analysis of the behavior of the protection systems charged with the task of eliminating the failure, as well as the operational context in which the environment that provided it was inserted. From the data collection, the failure under study was clarified in order to expose how it evolved to its apex, and the importance of a correct management in what involves the electrical system shows its essentiality in the case in question.

Keywords: Analysis; Failure; Cubicle; Substation.

1. INTRODUÇÃO

Uma correta gestão dos riscos envolvidos nos processos que permeiam o sistema elétrico de potência, que engloba a geração, transmissão e consumo de energia elétrica, é cada vez

¹ Acadêmico do 10º Período do curso de Engenharia Elétrica da Faculdade do Noroeste de Minas - FINOM. werickads@gmail.com,

² Professor orientador. marciosfernandes@gmail.com

Recebido em 15/03/2020
Aprovado em 24/03/2020

mais necessária por parte dos setores e empresas que atuam neste ramo. Acidentes com origem em falhas elétricas, além de gerar potencial para que ocorram danos pessoais aos trabalhadores, causam perdas produtivas e operacionais às empresas, perdas estas que refletem negativamente na saúde moral e financeira das mesmas. (BRENNER, 2013).

No momento em que, apesar de planejamento e controle operacional, uma falha vem a ocorrer no setor elétrico, o ato de determinar as causas e circunstâncias nas quais a mesma ocorreu é de importância fundamental para que o evento possa ser entendido como um todo, e é nesse contexto que a realização de análises de falhas se mostra essencial. Segundo Afonso (2002), o principal objetivo de uma análise de falha é justamente evitar a ocorrência de novas falhas. A investigação de uma falha deve determinar suas causas básicas para que se possa, com base nessas informações, viabilizar a execução de medidas corretivas que impeçam que o problema volte a acontecer.

O artigo tem como analisar desarme de energia decorrente de falha no cubículo da subestação de uma mineradora situada em Paracatu, noroeste de Minas Gerais; realizar análise sistemática da falha ocorrida; determinar, com base em análise, os motivos que levaram a tal acontecimento e apontar medidas corretivas e procedimentos necessários para evitar possíveis falhas futuras.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

Para que a compreensão da falha ocorrida seja feita de maneira correta é necessário um conhecimento prévio a respeito de como o funciona o fornecimento de energia à mineradora em questão e como tal energia é redistribuída em seus interiores.

A mineradora na qual as pesquisas se concentram é dividida em duas plantas, Planta I e Planta II. Cada uma dessas plantas possui uma subestação própria que realiza a distribuição de energia numa tensão adequada às mesmas. Estas subestações são identificadas como 43-SE-01 para a situada na Planta I, e 43-SE-501 para a situada na Planta II. A subestação 43-SE-501 é abastecida por uma linha de transmissão proveniente de outra subestação identificada como 66-SE-501 localizada a 34km da empresa e que realiza o rebaixamento de tensão do nível de 500/230 kV. Após rebaixada, a linha de 230 kV que se estende ao longo 79 estruturas fornece energia à 43-SE-501 que por sua vez realiza sua função em duas etapas. A primeira diz respeito ao abastecimento da própria Planta II, em que por meio de dois transformadores, 43-TF-501A e 43-TF-501B, a tensão é convertida de 230/13.8 kV e sequencialmente utilizada

para alimentar as Barras A (43-QF-501A) e B (43-QF-501B) localizadas na mesma subestação e consequentemente alimentar a planta. A segunda etapa engloba o processo de transmissão de energia à subestação 43-SE-01, em que a partir da mesma linha de 230 kV proveniente da 66-SE-501, três autotransformadores, 43-AT-501A/B/C, convertem a tensão de 230/138 kV e por meio de linhas de transmissão abastecem a subestação da Planta I, que por sua vez rebaixa a tensão de 138/13.8 kV e alimenta a planta. A estrutura que viabiliza tal procedimento pode ser vista no esquema unifilar da Figura 1.

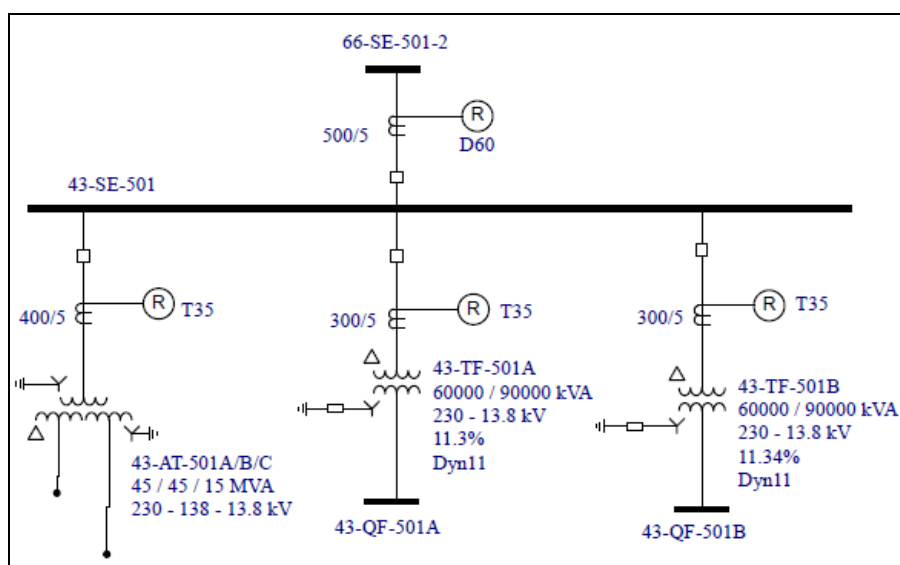


Figura 1: Esquema Unifilar de Fornecimento de Energia à Empresa. Fonte: O autor.

2.2 Contexto Operacional

O cubículo no qual a falha veio a ocorrer fica localizado na Barra A da subestação 43-SE-501, onde assume posto de cubículo de entrada da mesma e é identificado por C01A. É ele o responsável pela alimentação e proteção de toda a Barra A, onde metade das cargas da Planta II, dentre elas moinhos e subestação da britagem, estão instaladas. Além da Barra A, este cubículo possui a função de proteger o transformador 43-TF-501A, o qual o fornece alimentação em 13,8 kV. Para cumprir com sua tarefa, o cubículo de entrada da Barra A possui um disjuntor de proteção a vácuo fabricado pela ABB, que por sua vez, de acordo com a própria ABB (2017), não necessita de um meio de interrupção e isolante.

O disjuntor em questão possui as seguintes especificações:

Tabela 1 - Especificações do Disjuntor.

Fabricante	Modelo	Tensão	Corrente Nominal	Corrente Curto-Circuito
ABB	VD4 1740-31	17,5 kV	4000 A	31,5 kA

Fonte: O autor.

Este disjuntor, constituído por polos separados que caracterizam as três fases do mesmo, cada qual com uma ampola a vácuo em seu interior, é comandado por um relé de proteção, modelo Multilin 469, fabricado pela GE.

De modo a determinar as condições nas quais o cubículo se encontrava no período em que a falha veio a ocorrer, foi feito o levantamento de todas as atividades realizadas no mesmo, desde o momento em que foi incorporado à subestação, até o instante da falha. Esse levantamento, além de possibilitar uma visão mais ampla dos procedimentos operacionais realizados no cubículo e a forma como os mesmos foram distribuídos, permite verificar se a falha em questão foi desencadeada ou influenciada por alguma atividade anterior à mesma e o contexto no qual o cubículo vinha atuando.

Os procedimentos em pauta foram organizados em ordem cronológica e podem ser visualizados no esquema apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Atividades Realizadas no Cubículo.

Período		Atividades
2008		- Início Operação Planta II.
2012		- Aquecimento dos contatos fixos; - Troca dos parafusos de fixação dos contatos; - Manutenção preventiva com fabricante do cubículo; - Habilitado ventilador em tempo integral.
2015	17/03	- Realizada manutenção preventiva no cubículo. Ordem: 1029695.
	06/08 e 22/09	- Realizada termografia no barramento de entrada.
	03/11	- Realizada manutenção preventiva no cubículo. Ordem: 1448440.
2016	08/06	- Realizada manutenção preventiva no cubículo. Ordem: 1739802.
	24/11	- Realizada termografia no barramento de entrada.
	01/12	- Realizada manutenção preventiva no cubículo. Ordem: 2265926.
2017	22/05	- Realizada manutenção preventiva no cubículo. Ordem: 2474310.
	03/07	- Parada da planta por indisponibilidade hídrica.
	01/11	- Retorno da operação da planta às 07:00h; - Falha no cubículo de entrada da Barra A às 12:29h.

Fonte: O autor.

2.3 Aspectos Técnicos e Proteções

Após retorno da operação na Planta II às 07:00h, inoperante até então por indisponibilidade hídrica, houve parada corretiva não programada em um de seus moinhos cujo TAG é 26-MO-505. Às 11:28:30 h houve uma nova tentativa de operação do mesmo, ficando este operando por 28s até o início da falha no cubículo. Às 11:28:58:714 h uma falha na câmara de

extinção à vácuo, mais precisamente na fase S do disjuntor situado no cubículo de entrada do 43-QF-501A (Barra A), desencadeou o início de um curto-circuito fase-terra. Devido ao resistor de aterramento, cuja finalidade é limitar correntes de falta fase-terra a um valor que não danifique os equipamentos e minimizar o risco de acidentes pessoais, a intensidade da corrente do curto foi limitada a 357 A acionando a função ANSI 50GS do relé GE F650 responsável pela proteção do cubículo, no qual o tempo definido (DT) a que está condicionada possui tempo de atuação em torno de 0.75s para este nível de corrente. O curto-circuito fase-terra permaneceu durante 166ms, cessando às 11:28:58:880 h, se estabelecendo por tempo inferior ao mínimo necessário para que a proteção atuasse. Neste momento, devido à elevação da temperatura e à ocorrência de arcos elétricos no interior do cubículo, o curto-circuito fase-terra evoluiu para um curto-circuito trifásico envolvendo as Fases T e R do disjuntor que passaram a contribuir para a falta. No local da falha a intensidade da corrente de curto-circuito trifásico chegou a 13,5 kA sendo refletida no primário do transformador 43-TF-501A, cuja relação de transformação é 230/13.8 kV, com intensidade de 810 A. Estes níveis de corrente acionaram simultaneamente as funções ANSI 51 do relé GE F650 cujo tempo mínimo para a atuação é de 0.8s, e ANSI 51 do relé GE T35, responsável pela proteção do transformador e por realizar a abertura do disjuntor a montante (DJ1) do 43-QF-501A, sendo que para esta última, em caso de corrente inferior a 1080A o tempo de atuação do relé estará condicionado à curva inversa com tempo mínimo de atuação em torno de 1s, demonstrando dessa forma coordenação entre as curvas das proteções. Após 0.8s do início da falta trifásica, às 11:28:59:680 h, o relé GE F650 deu comando para a abertura do disjuntor de proteção do cubículo (DJ2), porém sem confirmação, já que este se encontrava extremamente danificado por decorrência da falha. Com a falta trifásica ainda em vigor a próxima proteção a atuar seria o comando por parte do relé GE T35 para a abertura do disjuntor a montante (DJ1) que cessaria o curto-circuito, porém, antes que esta proteção atuasse, a proteção dos autotransformadores 66-AT-501A/B/C de 500/230 kV situados na subestação 66-SE-501, cujo responsável pela mesma é o relé ABB RET 670, ao entender a falha como sendo uma sobrecarga devido ao aumento da corrente em seus terminais em virtude do curto-circuito, atuou a função ANSI 49 abrindo os disjuntores ligados aos extremos dos autotransformadores (DJ3 e DJ4). No momento em que os disjuntores foram abertos, o relé D60, responsável pela proteção da linha de 230 kV que alimenta a mineradora, atuou a função ANSI 27 que abriu o disjuntor anterior à subestação 43-SE-501 (DJ5) às 11:28:59:871 h, interrompendo assim o fornecimento de energia à empresa e consequentemente finalizando o curto-circuito trifásico que durou 985ms. No

diagrama unifilar apresentado na Figura 2 é possível visualizar a estrutura de operação e a localização dos componentes envolvidos no ocorrido.

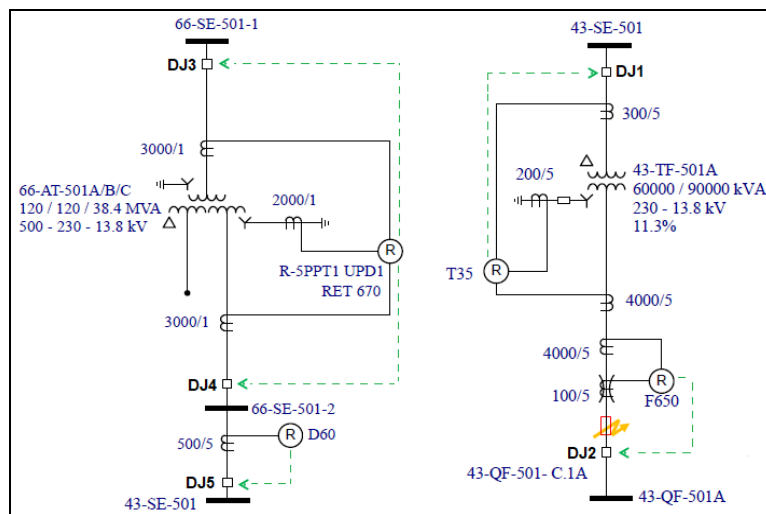


Figura 2: Estrutura Unifilar dos Sistemas Envolvidos na Falha. Fonte: O autor.

A falha em questão causou enorme impacto operacional, que se deu principalmente pelo fato de todo o site ficar inoperante por 8.63 horas, e pela parada de dois moinhos bolas por 256 horas. Além de prejuízo financeiro, agravado pelo fato da falta ter desencadeado princípio de incêndio no cubículo, diversos setores da empresa tiveram que se mobilizar para controlar as consequências geradas pela falha.

O comportamento das correntes envolvidas na falha foi analisado com base na oscilografia da Barra A. Por meio da oscilografia, o momento do surgimento do curto-circuito fase-terra, sua evolução para um curto-circuito trifásico, e o instante em que foi extinto graças à atuação da proteção puderam ser observados de forma clara e precisa. A oscilografia em questão pode ser visualizada na Figura 3.

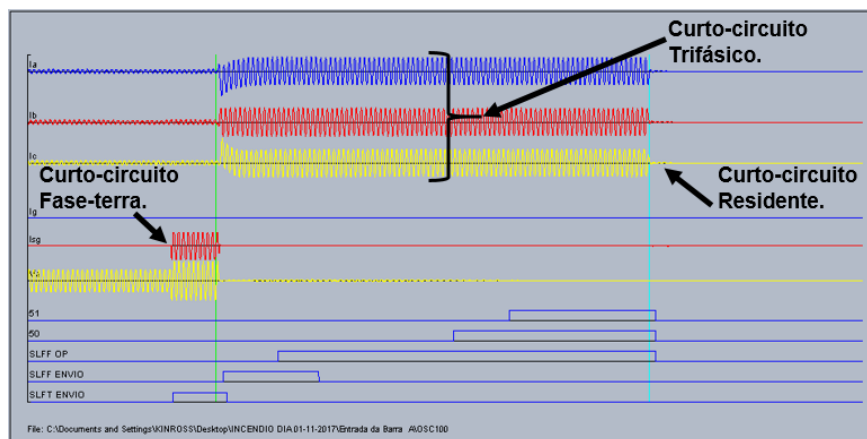


Figura 3: Oscilografia Barra A. Fonte: O autor.

2.4 Análise Estrutural das Proteções

Com base nos aspectos técnicos envolvidos na falha no cubículo, o tempo necessário para que tal anomalia fosse controlada, e o local onde a mesma veio a ocorrer tendo como base de referência a localização dos dois disjuntores responsáveis pela proteção da Barra A e do transformador que a alimenta, três elementos foram analisados devido à importância que os mesmos exerceram ou exerceriam no caso em questão. Esses elementos são: zona morta, coordenação e seletividade, e proteção contra falha de disjuntor (ANSI 50BF).

2.5 Zona Morta

Segundo Malafaia (2017), zona morta pode ser definida como sendo trechos de um sistema elétrico onde não há uma proteção designada para controlar curtos circuitos que ali venham a ocorrer. A Figura 4 ilustra uma situação em que uma falha ocorre em uma zona morta. Nesse contexto, no momento em que a sobrecorrente é detectada pela proteção, a mesma atua abrindo o disjuntor, porém tal ato não será suficiente para isolar a região de curto-circuito devido ao fato do mesmo ser alimentado por uma fonte situada ao lado oposto do disjuntor.

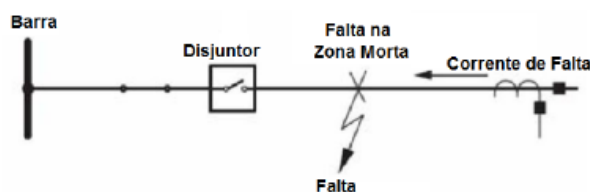


Figura 4: Falha em Zona Morta. Fonte: Malafaia, 2017.

Como pode ser analisado na Figura 2, o local onde a falha veio a ocorrer se caracteriza como sendo uma zona morta pois se localiza entre os TCs relacionados ao relé GE F650 e o disjuntor (DJ2). Apesar do disjuntor do cubículo (DJ2) não ter respondido ao comando para abertura por parte do relé GE F650 0.8s após o início do curto-circuito trifásico devido ao estado em que o mesmo se encontrava por decorrência da falha, mesmo se estivesse em condições de operação e atuasse quando solicitado, o curto-circuito não seria extinto pois era alimentado pelo transformador 43-TF-501A situado no lado oposto ao barramento, e a falha procederia da mesma forma como ocorreu.

2.6 Coordenação e Seletividade

Segundo Volpe (2017), a coordenação representa a definição das prioridades na atuação das proteções do sistema. No caso de uma falha, os relés devem identificar o surgimento do curto-circuito e caso o disjuntor mais próximo não atue, o disjuntor a montante deve ser acionado. Entre a atuação desses dispositivos deve haver um intervalo de tempo para que a abertu-

ra do disjuntor a montante não seja acionada antes que a proteção mais próxima à falta tenha o tempo necessário para operar, esta filosofia recebe o nome de seletividade cronológica.

Outra forma de se coordenar seletivamente as proteções de um sistema elétrico em ambientes que utilizam relés digitais é através da seletividade lógica. Nesta forma de seletividade, os relés de proteção são associados a cabos de comunicação que permitem a transferência de informações a outros equipamentos de proteção. Com isso, no momento em que uma falta vem a ocorrer, o relé mais a jusante da mesma bloqueia as proteções dos relés à montante, reduzindo significativamente o tempo de proteção. Caso a falta não tenha sido extinta após o período necessário para que a proteção mais a jusante atue, o relé a montante, anteriormente bloqueado, envia sinal de trip a seu disjuntor correspondente, extinguindo a falta. (COGO; RIBEIRO; MAGALHÃES, 2015).

Apesar da função responsável pela seletividade lógica estar habilitada no relé GE T35 no momento da falha no cubículo, como seu ajuste de pick-up estava configurado para 3.6pu, equivalente a 1080 A, e a corrente refletida no secundário do transformador ser de 810 A, tal função não foi sensibilizada com o envio de bloqueio por parte do relé GE F650 e por isso não atuou. Porém, mesmo que tal função fosse sensibilizada durante o incidente, o tempo total da ocorrência da falta não seria reduzido. Isto se dá pelo fato de que o tempo mínimo em que o relé GE T35 ficaria bloqueado seria aproximadamente o tempo de atuação do relé GE F650, ou seja 0.8s, desse modo, o relé ABB RET 670, situado na 66-SE-501, atuaria da mesma forma. No período em que a falha ocorreu, apenas a seletividade cronológica desempenhou seu papel da forma como foi parametrizada.

2.7 Proteção Contra Falha de Disjuntor (ANSI 50BF)

Na ocasião em que um relé de proteção vem a atuar em uma subestação, o mesmo emite dois disparos distintos de sinais. O primeiro disparo inicia a sequência de trip que aciona o contato do disjuntor e faz a abertura do mesmo, e o segundo tem como destino a unidade responsável pela proteção contra falha do disjuntor em questão. A unidade de proteção de falha de disjuntor, com o objetivo de certificar que a proteção atuou da forma correta, realiza o monitoramento tanto do contato que indica a posição do disjuntor (aberto/fechado) quanto da corrente que circula pelo mesmo, esse monitoramento é feito durante duas contagens de tempo distintas, o *Tretrip* e o *TBF*. Após o primeiro período de tempo, *Tretrip*, é realizada uma nova tentativa de abertura do disjuntor através de uma cadeia de trip independente chamada de retrip. Desse modo, caso haja alguma interferência na saída do equipamento, que veio a impedir que o comando para abertura do disjuntor chegasse ao mesmo, com o retrip o sinal finalmente chegará ao disjuntor. Porém, se mesmo após o retrip não seja detectada a abertura

do disjuntor ao final da segunda contagem de tempo, *TBF*, a unidade de proteção declara falha do disjuntor e realiza o disparo para abertura dos disjuntores adjacentes ao disjuntor em falha. Desse modo o disjuntor em falha é isolado e o curto-circuito é extinto. (MALAFAIA, 2017).

Apesar da importância que a função de proteção contra falha de disjuntor (ANSI 50BF) possui, principalmente em sistemas elétricos de grande porte, a mesma não foi contemplada no estudo de proteção e seletividade da empresa onde a falha em análise veio a ocorrer. Caso estivesse habilitada, o curto-circuito trifásico haveria sido extinto em aproximadamente 0,8s após seu início, o que reduziria significativamente as consequências geradas pela falta.

2.8 Análise da Câmara de Extinção do Disjuntor Pós-Falha

Como forma de identificar a causa que deu origem ao curto-circuito envolvido na falha, foi realizada uma análise do disjuntor de proteção do cubículo, mais especificamente de seus contatos. Segundo a ABB (2016), fabricante do disjuntor em questão, no que diz respeito a seu aspecto construtivo, os disjuntores da série VD4 são elaborados com uma técnica de construção que adota polos separados (Fases R, S e T). Dessa forma, no interior de cada polo existe uma ampola a vácuo que é englobada na resina diretamente na fase de moldagem do cilindro.

Como a falha no cubículo se iniciou por meio de uma falta fase-terra partindo da ampola de extinção a vácuo da Fase S do disjuntor, a análise realizada teve como foco os contatos que ficam alocados no interior das ampolas. Como pode ser observado na Figura 5, em que é possível visualizar o disjuntor de proteção após a falha e a condição dos contatos referentes às fases T e R do mesmo, sua Fase S, local de origem do curto-circuito, por decorrência do mesmo, foi danificada a ponto de se desprender da estrutura do disjuntor.

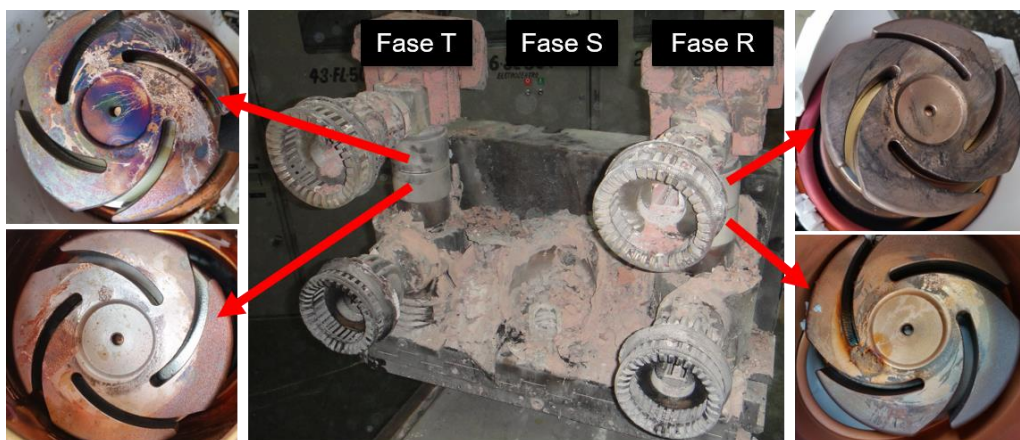


Figura 5: Contatos Situados na Câmara de Extinção do Disjuntor. Fonte: O autor.

Como pôde ser visualizado na imagem da Figura 5, os contatos possuem indícios da ocorrência de pequenas descargas parciais, porém, não é possível determinar se tais descargas ocorreram antes ou depois da falha. Segundo o Centro de Reparos ABB (2010), a abertura dos disjuntores em condições adversas, como curtos-circuitos e sobrecorrente, causa a oxidação da camada de metalização que existe nos terminais do equipamento. As rugosidades geradas em decorrência dessa oxidação, aumentam consideravelmente as resistências de contato do disjuntor (valor máximo aceitável em torno de $100\mu\Omega$), o que conseqüentemente provoca o surgimento de pontos quentes no mesmo, fazendo com que chegue a uma temperatura que pode danificar o equipamento.

Recomendações do Fabricante a Respeito da Manutenção do Disjuntor

De modo a verificar se as manutenções e inspeções preventivas realizadas no disjuntor de proteção do cubículo de entrada da barra A foram feitas da forma como orienta o fabricante e conseqüentemente não tenham contribuído para o incidente, o manual que agrupa tais recomendações foi analisado para que se fosse possível a comparação com o que vinha sendo feito.

Conforme a ABB (2012), em seu manual sobre instruções para a instalação e funcionamento dos disjuntores da série VD4 de média tensão, a expectativa de vida dos disjuntores VD4 é de até 30.000 manobras para as ampolas a vácuo, atuador e sistema de transmissão atuando em condições operativas normais. Nesse período de tempo, o fabricante recomenda a realização de inspeção e manutenção dos dispositivos de interrupção e a substituição integral do atuador a cada 10.000 manobras, assim como a substituição integral do amortecedor e dos outros elementos do sistema de transmissão (eixo, alavancas principais, anéis de bloqueio, etc.) após 30.000 manobras. Com relação ao polo do disjuntor e sua ampola a vácuo correspondente, o manual informa que os mesmos são isentos de manutenção até que o número máximo de manobras elétricas previstas para o tipo de ampola seja atingido. Além da manutenção propriamente dita, a ABB recomenda a realização periódica de inspeções visuais nos dispositivos de interrupção em geral, e caso seja detectado sinais de superaquecimento nas zonas de contato dos mesmos é recomendado que tais superfícies sejam devidamente limpas.

Tendo em mente tais recomendações por parte da ABB e o período no qual as mesmas devem ser aplicadas, a Figura 6 e a Figura 7, nas quais podem ser visualizados o contador de manobras do disjuntor de proteção da Barra A e a placa de identificação do mesmo, respectivamente, apresentam o estado em que este se encontrava até o momento do incidente.



Figura 6: Contador Manobras. Figura 7: Placa do Disjuntor.
Fonte: O autor. Fonte: O autor.

Apesar do tempo em que o disjuntor estava em operação, aproximadamente 10 anos, determinado a partir das informações apresentadas na placa do mesmo (Figura 7), ocorreram um baixo número de manobras até o período da falha, apenas 270. Vale lembrar que de acordo com as informações do próprio fabricante, este disjuntor é projetado para suportar até 30.000 manobras antes do fim de sua vida útil.

Após obter as instruções e recomendações do fabricante do equipamento, foi realizada uma busca pelos planos de manutenção destinados às instalações da subestação 43-SE-501. Apesar da existência de planos de manutenção com instruções mais abrangentes, com relação ao disjuntor de proteção situado no cubículo, local de origem da falta responsável pela falha, as manutenções preventivas voltadas a este equipamento se limitaram apenas a inspeções visuais, o que de acordo com o fabricante seria o suficiente para garantir o correto funcionamento do mesmo, já que este não havia atingido o número mínimo de manobras exigidas para manutenções mais específicas. Como pode ser visualizado na Figura 8, a qual apresenta a última ordem de serviço para inspeção no cubículo de entrada da Barra A antes da falha, o empregado responsável por tal atividade deixa claro que não foi encontrado nenhuma anomalia no local.

R5648001	Kinross Gold Corporation Work Order Print		Data - 19/05/2017 Hora - 12:22:35 Pág. 40 W.O. Page Number: 1	
Nº Ordem	2474310	Tipo Ordem	WM	Ordem de Serviço de Manutenção
Filial	292	Tipo	2	PM
Descrição	MP CUBICULO DE ALIMENTAÇÃO		Estado	55 LIBERADO PARA EXECUCAO
Numero Matricula	62112	CUBICULOENTBARRAA43QF501A	Prioridade	L TRABALHO PRIORIDADE BAIXA
Tag Pai	43QF501AC01A CUBICULO ENT BARRAA43QF501A		Solicitante	9507 Skagit Regional Clinics
Area	020	PLANTA	Data Abertura	09/05/2017
Criticidade	2	CRITICIDADE - MODERADA	Inicio Programado	22/05/2017
Oficina Executante	90029	KBM SETOR DE SISTEMAS ELETRICO	Final Programado	22/05/2017
Disponibilidade da Linha			Permissão Trabalho	
Planejador	19873 Mota, Igor Rodrigues Da			

Data	Matricula	Seq. Oper.	Horario Inicio	Horario Termin	Tipo Hora	Ações Tomadas
22/05/17	93214	10.00	11:00	11:42		* Realizada inspeção visual do cubículo e não foi encontrada anomalia !!
	93248					
	93246					

Figura 8: Ordem de Serviço para Cubículo de Entrada do 43-QF-501A. Fonte: O autor.

Termografias no Cubículo de Entrada da Barra A

As inspeções preditivas realizadas no cubículo de entrada da Barra A incluía o uso da termografia nos equipamentos da subestação em seus procedimentos. Segundo Santos (2010), a termografia pode ser definida como um procedimento técnico que permite medir à distância a temperatura referente a cada ponto de um equipamento ou sistema elétrico.

De modo a verificar a existência de pontos quentes, tanto no cubículo quanto no disjuntor de proteção situado no mesmo, em períodos antes da falha, foram analisados os termogramas correspondentes às ultimas análises feitas nesses locais. A Figura 9 traz em si as termografias realizadas nos anos de 2015 e 2016 nos pontos em questão.

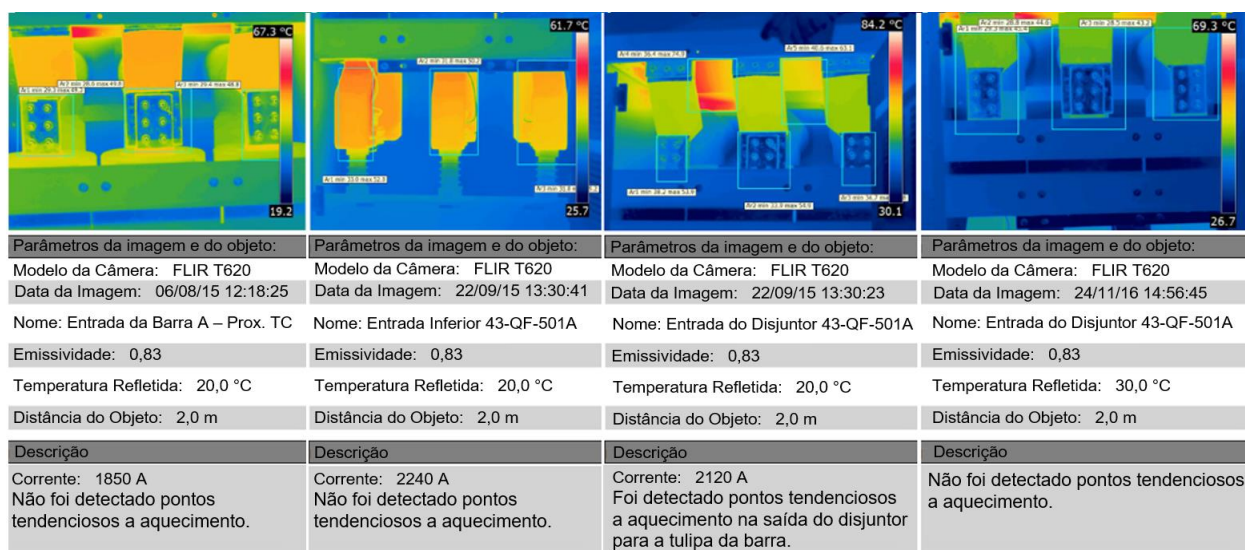


Figura 9: Termografias 43-QF-501A C01A. Fonte: O autor.

Como pode ser observado nas imagens termográficas e nos comentários realizados pelo operador responsável pelas mesmas (Figura 9), das imagens registradas no ano de 2015 ape-

nas a que tinha como foco a entrada do disjuntor de proteção da barra A (local em que a falha viria a ocorrer) apresentou a existência de pontos que tendiam ao aquecimento, porém, a termografia realizada no mesmo local no ano de 2016 mostra que tais pontos já não apresentavam níveis de temperatura elevada, estando os mesmos na faixa normal de operação. De acordo com o plano de manutenção específico, o intervalo de tempo em que as termografias devem ser realizadas é de 180 dias, porém, como observado na Figura 9, a última termografia realizada no cubículo de entrada da Barra A foi em 2016. Tal ocorrência pode ser explicada pelo fato de que a planta se encontrava inoperante devido à indisponibilidade hídrica no momento em que as inspeções termográficas deveriam ser refeitas.

Sistema de Combate a Incêndio

A alta temperatura gerada pelo curto-circuito trifásico ocorrido durante a falha veio a desencadear um princípio de incêndio no cubículo de entrada da Barra A. Apesar deste cubículo estar equipado com um sistema de combate a incêndio no momento da falta, o mesmo não veio a atuar da forma como deveria, fazendo com que o fogo só viesse a ser controlado após a chegada da equipe de manutenção. Segundo a KENTEC (2014), o FirePro, sistema de combate a incêndio instalado nos cubículos da subestação 43-SE-501, é um gerador de aerossol cuja tecnologia se baseia principalmente em um composto sólido conhecido como SBK (Solid Bound Compound). O acionamento deste sistema desencadeia uma reação química (exotérmica) no composto sólido SBK, que se transforma, em um curto intervalo de tempo, em um aerossol de sais de potássio para extinção de incêndios de classes A, B e C.

Os FirePro's utilizados para a proteção dos cubículos da subestação, são ativados por meio de uma tecnologia conhecida como BTA (Bulb Thermal Actuator), em português, Bulbo Atuador Térmico. De acordo com a empresa FirePro (2016), o sistema BTA possui como ponto chave para sua atuação um bulbo de vidro que serve de invólucro para um líquido com alto coeficiente de dilatação. Durante a operação do sistema FirePro, caso a temperatura do ambiente no qual o mesmo está instalado venha a se elevar, o líquido dentro da lâmpada se expande até que a temperatura operacional é atingida. Nesse momento, o bulbo de vidro "explodirá" permitindo que o mecanismo térmico atue o pino de disparo embutido, ativando o sistema de proteção. As temperaturas nominais para o atuador térmico do bulbo variam com base em uma escala fixa identificada pela cor da lâmpada do mesmo, podendo ser, Laranja - 57° C, Vermelho - 68° C, Amarelo - 79° C, Verde - 93° C, Azul - 141° C e Malva - 182° C.

Com relação ao cubículo de entrada da Barra A, o sistema FirePro foi adotado e implementado como mecanismo de combate a incêndio a partir do ano de 2013, fato este que elimi-

na a possibilidade do mesmo não ter atuado devido a um tempo prolongado de uso, já que, de acordo com o próprio fabricante, o FirePro possui vida útil de até 15 anos. O projeto realizado para a implementação do FirePro no cubículo indicava a necessidade de que este fosse instalado em duas partes distintas do mesmo, desse modo, tanto o compartimento de comando quanto o compartimento dos barramentos foram equipados com o sistema, sendo que, neste último, sua localização foi a parte inferior do compartimento. Vale ressaltar que o projeto em pauta considerou a classe de temperatura 93° C (Verde) e o modelo FP-200S para todas as unidades instaladas no cubículo. Na Figura 10 podem ser observadas a vista lateral em corte do cubículo em questão com a representação esquemática da localização dos FirePro's contemplados no projeto, assim como o resultado físico de sua instalação.

De acordo com as recomendações por parte do fabricante para a instalação do FirePro utilizando o BTA, o mesmo deve ser instalado na parte superior do compartimento por ele protegido (esquema representado na Figura 11). Tal recomendação, como observado na Figura 10, foi ignorada no projeto para a implementação do FirePro no cubículo, já que, no compartimento dos barramentos, o dispositivo foi posicionado em sua parte inferior, o que justificava o fato desta unidade não ter atuado no momento do incêndio, que por sua vez, se concentrou na parte superior do cubículo, fazendo com que a temperatura refletida no bulbo não fosse o suficiente para seu disparo. Com relação à unidade FirePro instalada no compartimento de comando do cubículo, como pode ser averiguado na Figura 12, o bulbo responsável por seu disparo está íntegro, o que evidencia o fato da mesma também não ter atuado durante o incêndio. Sua não atuação se deve certamente à abertura do compartimento de comando pela equipe de manutenção ao chegar à subestação, instantes após a ocorrência da falha, sendo assim, a elevação da temperatura não foi suficiente para acionamento do FirePro.

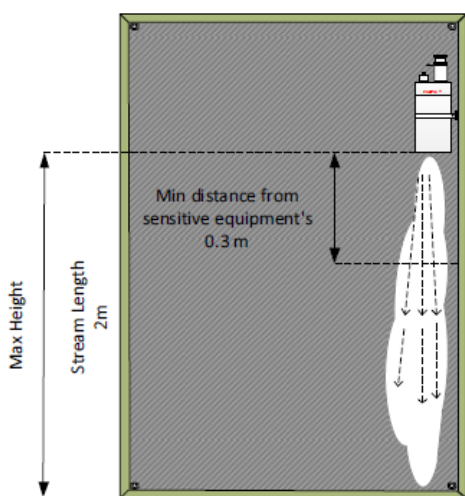


Figura 11: Orientação de Posicionamento do FirePro.
Fonte: FirePro, 2011.

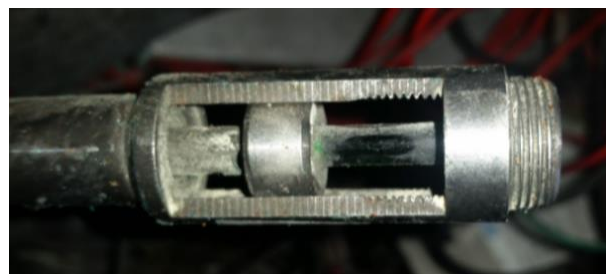


Figura 12: Bulbo FirePro Compartimento
Comando.
Fonte: O autor.

Componentes e Contatos Físicos no Cubículo

De modo a verificar se o curto-circuito responsável pelo incidente teve sua origem desencadeada por influência de algum componente estrutural interno ao cubículo ou às próprias conexões que partem do disjuntor, foi realizada uma análise pós-falha, englobando como foco de estudo as tulipas do disjuntor, a guilhotina, os contatos fixos e os barramentos de entrada e saída presentes no cubículo de entrada da Barra A.

Contatos Móveis (Tulipas) do Disjuntor

As tulipas, ou contatos móveis, são as áreas do disjuntor que se conectam diretamente ao barramento de média tensão, tornando possível o seccionamento necessário para a proteção de toda a barra. Na Figura 13 podem ser observadas as condições do disjuntor (mais especificamente de suas tulipas) antes e após a falha.

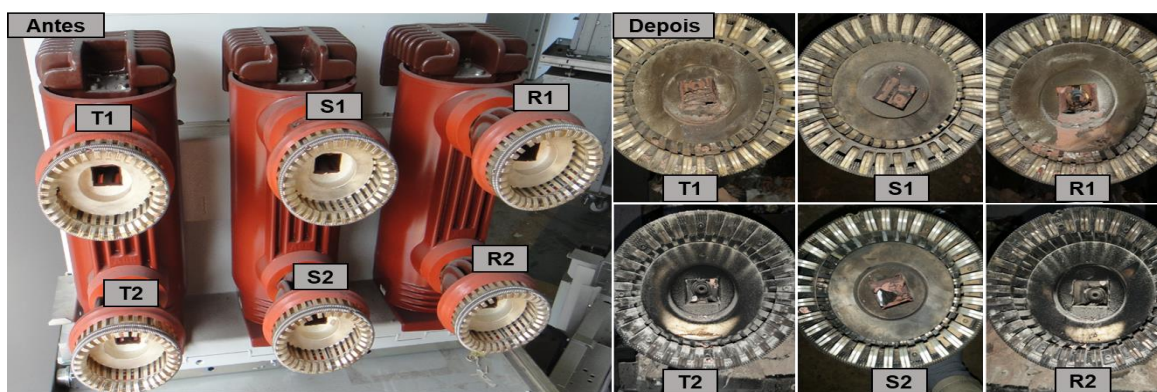


Figura 13: Tulipas do Disjuntor. Fonte: O autor.

Com base na vista frontal das tulipas (após a falta) retratada na Figura 13, apesar da carbonização apresentada pelas mesmas em função do incêndio, não há sinais de aquecimento ou relevo que possam indicar problemas de mal contato, sobrecorrente ou desalinhamento dos contatos fixos/móveis, o que torna isenta sua contribuição à falha.

Guilhotina e Contatos Fixos

O sistema de guilhotina presente no cubículo, cuja principal função é restringir o acesso aos contatos fixos do mesmo e consequentemente às suas partes vivas, como pode ser visto na Figura 14, não apresenta características de ter provocado o curto-circuito devido ao fato de não exibir danos, além dos causados pelo incêndio, nas regiões de provável contato com as tulipas do disjuntor.

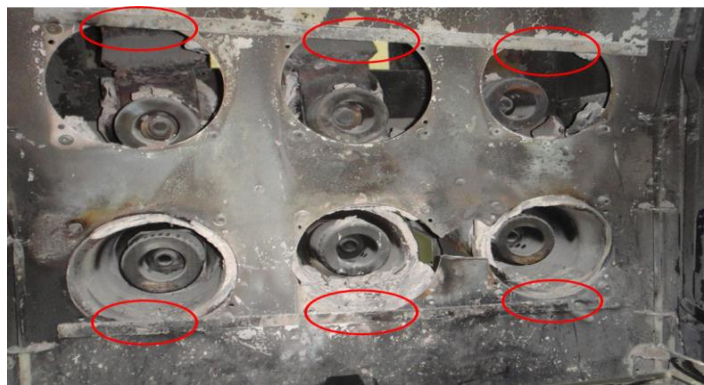


Figura 14: Sistema de Guilhotina Presente no Cubículo.
Fonte: O autor.

Com relação aos contatos fixos presentes no cubículo, responsáveis por servir de ponto de entrada para o abastecimento de toda a Barra A, e nos quais eram conectados os contatos móveis do disjuntor VD4 para a proteção da mesma, na Figura 15, o aspecto frontal destes contatos em momentos após a falha pode ser visualizado.

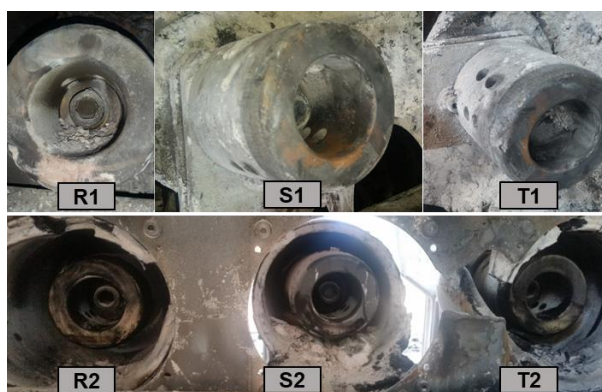


Figura 15: Contatos Fixos. Fonte: O autor.

Com base na Figura 15, apesar da carbonização gerada em função do incêndio sobre os contatos fixos, não há indícios de aquecimento gerado por fuga de corrente. Outro ponto que comprova a não participação destes contatos no surgimento da falha, é o fato dos mesmos, devido a não apresentarem danos que os comprometessem, terem sido reaproveitados durante o reparo do cubículo.

Barramentos de Entrada e Saída

Os barramentos de entrada localizados no cubículo de entrada da Barra A são responsáveis por conduzir a energia proveniente do duto de barras, cuja tensão está associada ao secundário do transformador 43-TF-501A, ao disjuntor de proteção do cubículo. A partir do disjuntor, a energia é transmitida ao barramento horizontal, também chamado de barramento de saída, e consequentemente utilizada para alimentar toda a Barra A. Como pode ser verificado na Figura 16, em que, a traseira do cubículo em questão, assim como a vista ampliada

dos barramentos de entrada e saída são exibidas, foi detectada apenas uma carbonização da isolamento dos barramentos em função da elevação da temperatura causada pelo incêndio. Além disso, estes barramentos foram reutilizados após a falha, o que evidencia o fato de não terem sido os responsáveis pelo início desta.

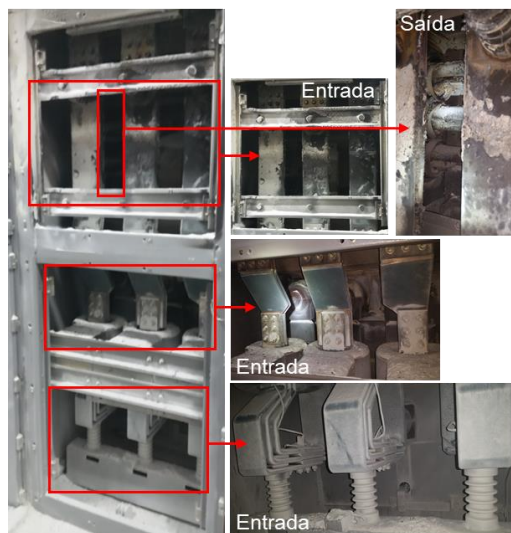


Figura 16: Barramentos de Entrada e Saída. Fonte: O autor.

Consumo de Potência Barra A

Como mencionado anteriormente, a ocorrência da falha se deu instantes depois do retorno da operação na Planta II, inoperante até então devido à indisponibilidade hídrica. De modo a determinar se houve uma possível relação entre a elevação do consumo de potência pela Barra A devido ao retorno das cargas que a integram e o incidente ocorrido, os níveis de consumo gerados por cada carga, assim como o instante em que as mesmas entraram em operação, e o consumo geral relacionado à Barra A, foram obtidos em forma de gráfico e relacionados ao instante da ocorrência da falta. Este gráfico pode ser visto na Figura 17.

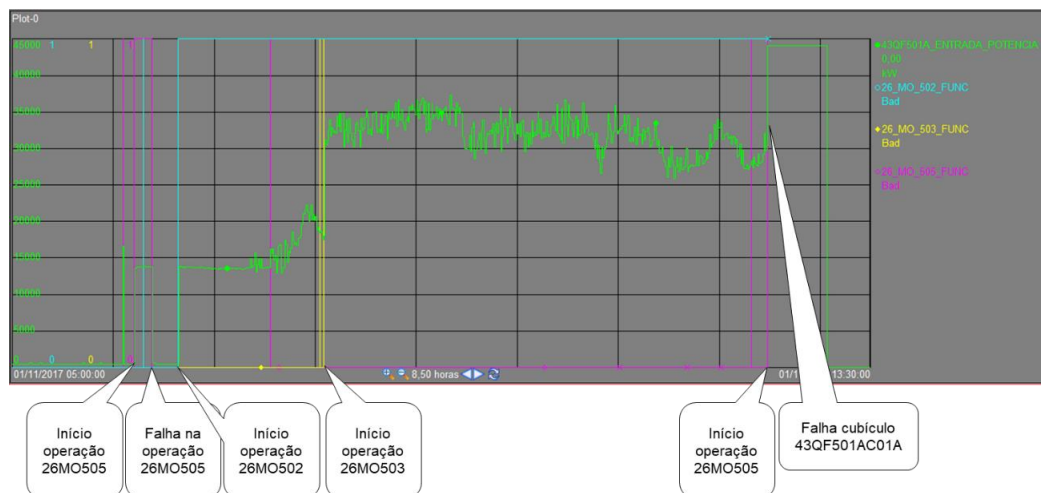


Figura 17: Consumo de Potência Barra A. Fonte: O autor.

Em condições normais de operação, a potência consumida nesta barra é de aproximadamente 56 MW, chegando a picos de 60 MW. No dia da falha, a potência estava próxima dos 30 MW e com a operação do moinho 26-MO-505, passaria para aproximadamente 45MW. Apesar do nível da potência não chegar a valores que excedessem ao apresentado em circunstâncias habituais, com o disjuntor em condições críticas seria o suficiente para desencadear a falta.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como observado no decorrer da análise apresentada durante a metodologia, cada tópico analisado, independentemente do fato de ter ou não influenciado de forma direta na ocorrência da falha no cubículo da subestação em estudo, caso administrado de maneira mais sistemática e rigorosa no que diz respeito ao planejamento e execução, contribuiria de maneira considerável para que a falha não alcançasse as proporções atingidas. Dessa forma, o esclarecimento a respeito da falha analisada, e a forma como os erros devem ser corrigidos para que possíveis incidentes futuros sejam evitados, são pontos essenciais para uma conclusão satisfatória.

Esclarecimento da Falta Ocorrida

Apesar dos sistemas e componentes externos ao disjuntor de proteção contribuírem para que falha chegasse ao nível atingido, os mesmos não tiveram participação na origem da falta que a desencadeou. Sendo assim, com base nos dados obtidos durante a análise (premissas), cabe a realização de um processo inferencial de modo a elucidar o acontecimento e a forma como progrediu até seu ápice.

A falha se inicia devido a um aquecimento excessivo no interior da câmara de extinção a vácuo do disjuntor (Fase S), causado devido a um mal contato entre os contatos fixos e móveis do mesmo, o mal contato gera arcos elétricos no interior da câmara, o que consequentemente eleva a resistência da superfície dos contatos da fase. A situação se agrava no instante em que o moinho 26-MO-505 entra em operação elevando o nível da potência da Barra A. Nesse momento, mais precisamente 28s após o moinho entrar em operação, a temperatura no interior da câmara chega a tal nível que causa o rompimento da blindagem da ampola, o que desencadeia a quebra do isolador cerâmico, assim como o derretimento da camada de epóxi (invólucro da ampola) pelo qual este estava envolvido. Após a violação das camadas de proteção nível a nível, se inicia o curto-circuito fase-terra a partir da Fase S do disjuntor de proteção. A alta temperatura e a ocorrência de arcos elétricos no interior do cubículo fazem com

que a falta fase-terra evolua para uma falta trifásica, o que consequentemente causa o derretimento do epóxi do disjuntor, aumentando ainda mais a temperatura do local e gerando sequencialmente o início do incêndio responsável pela maior parte dos danos.

Prejuízo Reparo/Operacional

Como mencionado anteriormente, a falha ocorrida no cubículo de entrada da Barra A e o incêndio gerado pela mesma, foram responsáveis por grande prejuízo financeiro, influenciado tanto pelos custos direcionados ao reparo dos equipamentos afetados, quanto pelo déficit na produção da empresa causado pela parada de dois moinhos de bolas por 256 horas. Na Tabela 3, os valores correspondentes aos custos com a substituição dos equipamentos danificados são especificados.

196

Tabela 3 - Custos com a substituição de equipamentos.

Equipamento	Quantidade	Valor
Quadro de Distribuição de Força (Cubículo).	1	R\$ 410.869,09
Duto de Barras	1	R\$ 222.362,62
Disjuntor VD4 ABB 4000A	1	R\$ 95.000,00
TOTAL		R\$ 728.231,71

Fonte: O autor.

No que se refere à produção afetada pelo incidente, a Tabela 4 expõe a quantidade de minério que deixou de ser processado pelos moinhos de bolas devido ao fato de estarem inoperantes durante o período citado.

Tabela 4 - Prejuízo operacional.

Processamento Médio Por Moinho	Quantidade de Moinhos	Horas Inoperante	Minério Não Processado
1,5 Toneladas/Hora	2	256	768 Toneladas

Fonte: O autor.

Ações Corretivas

Tendo em mente os prejuízos e impactos causados pela falha analisada, a realização de ações corretivas que visam impedir que tais anomalias voltem a acontecer é imprescindível para uma correta gestão operacional. Dessa forma, tendo como base a análise realizada, foi elaborada uma lista dos procedimentos necessários para a correção dos problemas identificados:

- Revisar e implementar o estudo de coordenação e seletividade, considerando proteção para zona morta e proteção contra falha de disjuntor;

- Revisar e implementar o estudo do sistema de proteção e combate a incêndio (FirePro), utilizando como base de dados as recomendações do fabricante e tendo como parâmetros aspectos como: localização, posição, quantidade, tipo de sensor e volume do sistema por compartimento;
- Adquirir ferramentas para a realização de ensaios elétricos nos disjuntores e realiza-los periodicamente;
- Realizar treinamento em manutenção de disjuntores VD4 direcionado à equipe de manutenção elétrica;
- Revisar o plano de manutenção dos disjuntores VD4;
- Inserir novos planos de manutenção para todos os disjuntores situados nas Barras A e B;
- Criar um plano de teste para os relés;
- Instalar relés de proteção contra arco elétrico nos cubículos e nos dutos de barras da subestação 43-SE-501 e realizar estudo para as demais;
- Certificar os responsáveis por termografias.

Otimização do Sistema de Proteção

Das ações corretivas citadas, aquela que exerceria maior influência sobre a falha ocorrida é sem dúvida a que se refere ao estudo de proteção, coordenação e seletividade nos relés de proteção. Dessa forma, de modo a otimizar o tempo de atuação do sistema de proteção, foram definidos os parâmetros com os quais os relés devem ser configurados para eliminar no menor tempo possível as faltas que venham a ocorrer nos trechos existentes no arranjo atual de abastecimento da Barra A. Estes trechos, assim como as ações realizadas pelos relés para faltas em cada um deles, podem ser observados na Figura 18 e na Tabela 5 respectivamente.

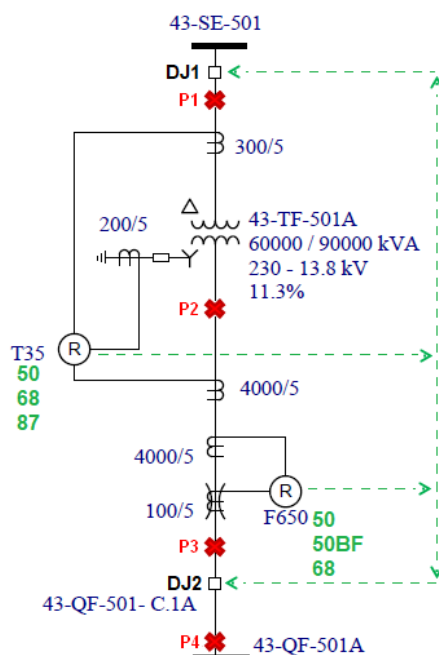


Figura 18: Pontos em que as Falhas Devem ser Corrigidas.
Fonte: O autor.

Tabela 5 - Parametrização Corretiva dos Relés para Falhas no Sistema.

Ponto em Falta	Relé Primário (GE T35)	Relé Secundário (GE F650)	Tempo de Atuação
P1	- A função ANSI 50 TOC 3 terá tempo de atuação instantâneo no disjuntor DJ1.	- Não será sensibilizado.	0s
P2	- Para falhas internas no transformador, a função ANSI 87 terá tempo de atuação instantâneo no disjuntor DJ1.	- Não será sensibilizado.	0s
P3	- A função ANSI 50 TOC 4 (ANSI 68) receberá sinal de bloqueio do relé F650. - A função ANSI 50 TOC 2 atuará como retaguarda em 1,0 s no disjuntor DJ1.	- A função 50 IOC 2 atuará em 0,1s no disjuntor DJ2. - Envio de bloqueio de seletividade lógica para o relé primário. - Como a corrente de curto-circuito não será eliminada, a função 50BF atuará em 0,15s no disjuntor DJ1.	0,25s
P4	- A função ANSI 50 TOC 4 (ANSI 68) receberá sinal de bloqueio do relé F650. - A função ANSI 50 TOC 2 atuará como retaguarda em 1,0 s no disjuntor DJ1.	- Envio de bloqueio de seletividade lógica para o relé primário. - A função ANSI 50 IOC 2 (ANSI 68) atuará em 0,1 s no disjuntor DJ2.	0,1s

Fonte: O autor.

Com a implementação dos parâmetros citados na Tabela 5, haverá uma redução significativa dos tempos de atuação dos relés de proteção. Porém, para que seja atingida uma maior eficiência no caso de faltas como a analisada, a implantação de um relé de proteção contra arcos elétricos no cubículo de entrada da Barra A é de fundamental importância. Este relé deverá ter pelo menos duas zonas de atuação, sendo uma desligando os disjuntores dos cubículos de entrada e a outra desligando os disjuntores a montante.

4. CONCLUSÃO:

Com base na análise desenvolvida no decorrer do estudo, fica claro a total isenção de responsabilidade de qualquer periférico externo ao disjuntor de proteção no desencadeamento da falha ocorrida. Dessa forma, é possível concluir que o motivo para as condições adversas no interior da câmara de extinção a vácuo do disjuntor, as quais são responsáveis pelo surgimento da falta fase-terra que progrediu até os níveis conhecidos, foi um defeito de fabricação do equipamento, que contrariando as expectativas do próprio fabricante não se manteve em correta operação, mesmo sob condições nominais de trabalho, até o fim de sua vida útil. Apesar da gravidade do incidente ocorrido, o fato mais surpreendente apontado pelo estudo foi a total ineficiência das proteções responsáveis pela mitigação da falha, que caso implementadas e parametrizadas de maneira mais estruturada, tornariam o episódio bem menos impressionante.

REFERÊNCIAS:

- ABB. **Disjuntores de média tensão a vácuo 12...36 kV - 630...4000 A - 16...50 kA**. 2017. Disponível em: <[https://library.e.abb.com/public/d6e948004e4f47e7bf96b671ec837e93/CA_VD4-50kA_\(PT\)W_1VCP000001_10.2017-DigiPrint.pdf](https://library.e.abb.com/public/d6e948004e4f47e7bf96b671ec837e93/CA_VD4-50kA_(PT)W_1VCP000001_10.2017-DigiPrint.pdf)>. Acesso em: 17 mar. 2018.
- ABB. **Disjuntores MT a vácuo para distribuição secundária**. 2016. Disponível em: <[https://library.e.abb.com/public/cec643042c6a4d1f9cdf0454e56c02ad/CA_VD4-R\(PT\)I_1VCP000263-02.2016.pdf](https://library.e.abb.com/public/cec643042c6a4d1f9cdf0454e56c02ad/CA_VD4-R(PT)I_1VCP000263-02.2016.pdf)>. Acesso em: 17 mar. 2018.
- ABB. **Instruções para a instalação e funcionamento 12 ... 36 kV - 630 ...3150 A - 16 ... 50 kA**. 2012. Disponível em: <[https://library.e.abb.com/public/a64dfcee4a235739c1257b130057478d/MA_VD4-36kV-50KA\(PT\)V_647654051-1201.pdf](https://library.e.abb.com/public/a64dfcee4a235739c1257b130057478d/MA_VD4-36kV-50KA(PT)V_647654051-1201.pdf)>. Acesso em: 17 mar. 2018.
- AFONSO, L. O. A. **Análise de falhas de máquinas rotativas - alguns pontos importantes**. Trabalho Apresentado no IEV, 2002.
- BRENNER, B. C. (2013). **Improving workplace electrical safety through self-assessment**. In: IEEE. Electrical Safety Workshop (ESW), IEEE IAS. [S.l.], p. 163_166.

CENTRO DE REPAROS ABB. **Manutenção e reparo para acionamentos, produtos de baixa tensão e automação.** 2010. Disponível em: <https://library.e.abb.com/public/75449407182b06a9832577bb0054746e/Catalogo_Centro_de_reparos.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2018.

COGO, J. R.; RIBEIRO, P. B.; MAGALHÃES, F. L. S. **Eliminação Mais Rápida de Falhas com a Seletividade Lógica.** Revista Eletricidade Moderna, São Paulo, v. 43, n. 493, p. 70-77, 2015.

FIREPRO. **BTA (Bulb Thermal Actuator).** 2016. Disponível em: <<https://www.fireprouk.com/media/8049/bulb-thermal-actuator-bta-data-sheet.pdf>>. Acesso em: 17 mar. 2018.

FIREPRO. **Information, Instruction & User Manual.** Limassol, v. 5, 2011. Disponível em: <<https://dokumen.tips/documents/firepro-user-manual-eu-2011-rev-5.html>>. Acesso em: 07 mai. 2018.

KENTEC. **Agente Extintor FirePro.** 2014. Disponível em: <http://samfire.com.br/assets/frontend/onepage/pdf/kentec_firepro.pdf>. Acesso em: 07 mai. 2018.

MALAFIA, M. G. **Sistema de Proteção de Transformadores de Extra-Alta Tensão Utilizando Relés Digitais.** 2017. 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

SANTOS, M. A. M. **O Emprego da Termografia na Inspeção Preditiva.** Revista Bolsista de Valor, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p. 219-222, 2010.

VOLPE, T. M. **Coordenação e Seletividade em uma Rede Elétrica de Distribuição.** In: SAISEE - SEMINÁRIO DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL E SISTEMAS ELETRO-ELETRÔNICOS, 4., 2015, Santa Rita do Sapucaí. Anais eletrônicos... Santa Rita do Sapucaí: Inatel, 2015. Disponível em: <<http://www.inatel.br/biblioteca/pos-seminarios/seminario-de-automacao-industrial-e-sistemas-eleto-eletronicos/ii-saisee>>. Acesso em: 21 abr. 2018.